

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

Návrh a realizace zdroje signálu PWM  
Design and realization of the PWM signal source

2012

Pavel Gesierich

## Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Gesierich**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika  
Téma: **Návrh a realizace zdroje signálu PWM**  
**Design and realization of the PWM signal source**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši možných variant realizace modulátorů PWM.
2. Specifikujte oblasti použití těchto modulátorů v odvětvích průmyslové a spotřební elektroniky.
3. Na základě pokynů vedoucího bakalářské práce navrhnete a realizujete zdroj signálu, použitelný v laboratorní výuce.

Seznam doporučené odborné literatury:

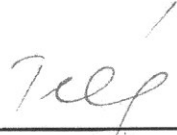
Dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

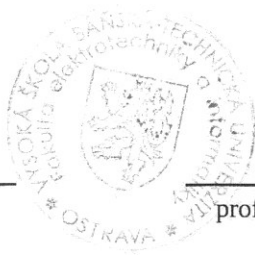
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

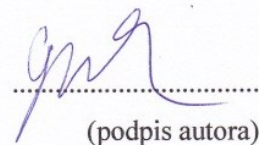


  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Rožnově pod Radhoštěm dne 4.5.2012

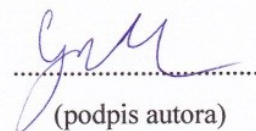


(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Rožnově pod Radhoštěm dne 4.5.2012



(podpis autora)

## **ABSTRAKT**

Práce je zaměřena na zdroje signálu PWM. Tyto zdroje signálu jsou dnes zcela běžné. Mnozí znají jejich princip, ale už mnohem méně je známo, jak takováto zařízení skutečně fungují. Zdroje signálu PWM jsou snadno k dostání v integrované podobě. Tato práce ale řeší realizaci diskrétními součástkami a operačními zesilovači. Metoda je obtížnější, klade důraz na pochopení principů a dějů, a to jak v samotném zdroji PWM, tak v jeho dílčích blocích, ale i v samotných součástkách. Práce řeší jak ryze obecné záležitosti, jako je např. funkce komparátoru, tak i konstrukční problematiku, jako je blokování napájecích kontaktů blokovacím kondenzátorem. Jedná se o kompletní návrh a realizaci zdroje signálu PWM, na jejímž konci je hotový výrobek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

PWM, Pulsně šířková modulace, PŠM, unipolární vyhodnocení PWM, bipolární vyhodnocení PWM, sinusový signál, trojúhelníkový signál.

## **ABSTRACT**

PWM signal source are quite common now. Many people know their principle, but less people know how works this mechanism in fact. Signal source PWM is available in integrated form. But work trying to solve implementation by discrete devices and operational amplifiers. This method is difficult, but emphasis on understanding the principles and processes. And it is not only in alone source but too in his partial block and devices. Work trying to solve only general thing. For example comparator function, structural problems as blocking source contacts by block capacitor. It is complete design and implementation of PWM signal source and on this end is finished product.

## **KEYWORDS**

PWM, Pulse width modulation, evaluation of unipolar PWM, evaluation of bipolar PWM, sine signal, triangle signal.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A$ [/]	Zesílení, bezrozměrné
$C$ [F]	Kapacita
$f_0$ [Hz]	Rezonanční kmitočet
$P$ [W]	Výkon
PWM	Pulse width modulation – pulzně šířková modulace
$R$ [ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
$U$ [V]	Napětí
$U_{IN}$ [V]	Vstupní napětí
$U_{OUT}$ [V]	Výstupní napětí

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Varianty realizace modulátorů PWM</b>	<b>2</b>
1.1 Porovnávání vstupního signálu s trojúhelníkovým signálem.....	2
1.2 Použití integrovaných struktur .....	3
1.3 Použití mikrokontroléru .....	3
<b>2 Použití těchto modulátorů v průmyslové a spotřební elektronice</b>	<b>4</b>
2.1 Spínané zdroje.....	4
2.2 Regulace osvětlení .....	4
<b>3 Návrh a realizace zdroje signálu, použitelného v laboratorní výuce na základě pokynů vedoucího bakalářské práce</b>	<b>6</b>
3.1 Wienův oscilátor .....	6
3.2 Generátor trojúhelníkového signálu.....	10
3.3 Bipolární vyhodnocení PWM .....	12
3.4 Unipolární vyhodnocení PWM .....	12
3.4.1 Vstupní operační usměrňovač.....	12
3.4.2 Zmenšení trojúhelníkového signálu a přičtení stejnosměrné složky. ....	14
3.4.3 Komparátory .....	17
3.4.4 Sumátor.....	19
3.5 Konstrukční záležitosti.....	20
3.5.1 Operační zesilovače .....	20
3.5.2 Přepínač sinusových signálů.....	20
3.5.3 Blokovací kondenzátory .....	21
3.6 Tvorba celkového zapojení schématu .....	21
3.7 Deska plošných spojů .....	22
3.8 Návod k použití.....	25
<b>4 Závěr</b>	<b>28</b>
<b>Literatura</b>	<b>29</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>30</b>

# ÚVOD

Tato práce řeší problematiku zdrojů signálů PWM. První kapitola uvádí varianty realizace modulátorů PWM. Ať už jde o metodu klasického porovnávání vstupního signálu s trojúhelníkovým, použití integrovaných obvodů nebo mikrokontroléru. Jsou zde shrnuty základní principy těchto realizací.

Ve druhé kapitole jsou uvedeny příklady oblastí použití PWM v elektronice. Je zde načrtnut princip spínaných zdrojů a požadavky na jeho součástky a jeho srovnání s lineárními zdroji. Dále je uvedena regulace osvětlení touto metodou.

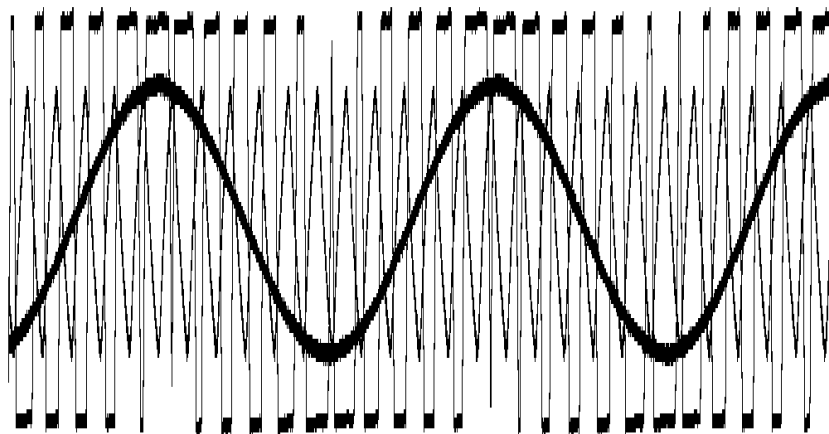
Třetí kapitola se zabývá návrhem konkrétního modulátoru PWM. Konkrétně zdrojem sinusového a trojúhelníkového signálu a následně jejich vyhodnocováním pro vznik bipolárního a unipolárního výstupu modulátoru. Mnoho principů a dějů je doplněno o obrázky z osciloskopu. Nechybí ani popis hotového výrobku včetně jeho návodu k použití.

# 1 VARIANTY REALIZACE MODULÁTORŮ PWM

## 1.1 Porovnávání vstupního signálu s trojúhelníkovým signálem

Jedná se o základní variantu modulátorů PWM. Vstupní signál, který má být modulován se přivede do modulátoru. Do modulátoru je nutno přivést i trojúhelníkový signál, se kterým bude vstupní signál porovnáván.

Bipolární modulátor funguje na principu, že pokud je vstupní signál větší, než aktuální hodnota trojúhelníkového signálu, modulátor překlopí do logické jedničky. Pokud bude vstupní signál menší, než aktuální hodnota trojúhelníkového signálu, modulátor překlopí do logické nuly. Tento proces je patrný z Obr.1.1, kde je jako vstupní signál použitý signál sinusový.



*Obr.1.1 Modulátor PWM, na který je přiveden sinusový signál*

Tento proces lze v praxi realizovat operačním zesilovačem zapojeným jako komparátor. Na jeho kladný vstup se přivede signál, který má být modulován, na záporný vstup trojúhelníkový signál.

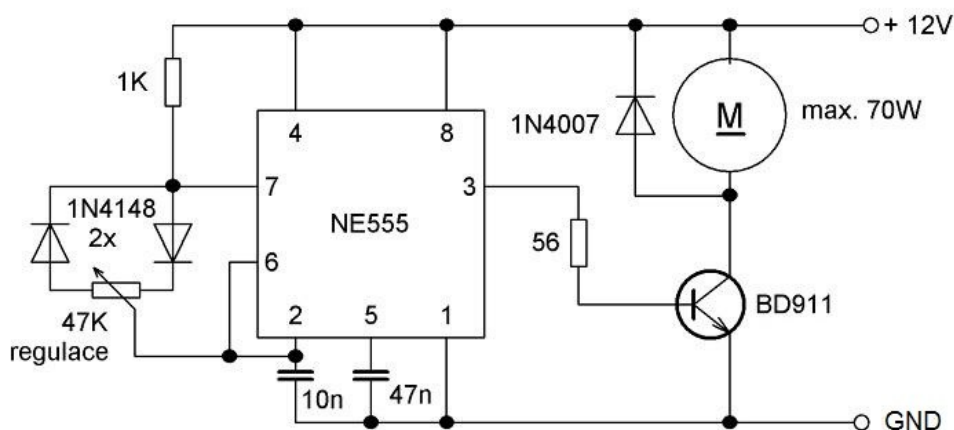
Na obdobném principu lze vytvořit i unipolární modulátor. Ten musí rozeznat, zda vstupní signál má kladnou či zápornou hodnotu. Kladná část se totiž zpracovává odděleně od záporné. Zpracování dané polaritě signálu probíhá tak, že se porovnává s trojúhelníkovým signálem stejné polaritě. Výsledný modulovaný signál má tutéž polaritu, jako vstupní signál.



## 1.2 Použití integrovaných struktur

Další variantou realizace PWM modulátorů je použití integrovaných obvodů. Zde není potřeba připojovat trojúhelníkový signál, integrovaný obvod si ho vytváří sám ve své vnitřní struktuře.

Jsou k dispozici drahé a kvalitní integrované obvody, ale k tomu účelu lze použít i integrované obvody levnější, jako je například NE555. Schéma zapojení s tímto integrovaným obvodem je na Obr.1.2. Regulace střidy se provádí potenciometrem o hodnotě 47kΩ. Výstupní modulovaný signál je odebírán ze třetího pinu obvodu NE555. Ten je nuntou proudově posílit tranzistorem. Jako zátěž je připojen motor.



Obr.1.2 PWM vytvořeno z integrovaného obvodu 555 (převzato z [6] )

Toto zapojení má nevýhodu, že výstupní signál lze ovlivnit pouze potenciometrem, nikoli přivedeným vlastním vstupním signálem. Jedná se tudíž jen o jakýsi generátor PWM signálu a nikoli modulaci v pravém slova smyslu.

## 1.3 Použití mikrokontroléru

Jak plyne ze samotné podstaty mikrokontroléru, mikrokontrolér pracuje vždy tak, jak vyžaduje program. Nelze tedy zcela jednoznačně uvést, jak se takový modulátor PWM vytvořený z mikrokontroléru chová. Chování modulátoru také ovlivňují periferie, které bude mít mikrokontrolér k dispozici.

## **2 POUŽITÍ TĚCHTO MODULÁTORŮ V PRŮMYSLOVÉ A SPOTŘEBNÍ ELEKTRONICE**

### **2.1 Spínané zdroje**

PWM je součástí většiny spínaných zdrojů. Spínané zdroje se v současné době používají čím dál častěji, než klasické lineární zdroje, jak se uvádí v [3]. Spínané zdroje mají mnohem lepší účinnost. Ta se pohybuje od 65% do 80%. Zatímco klasické lineární zdroje mají účinnost cca 30%.

Spínané zdroje jsou oblíbené i díky svým rozměrům a hmotnosti. Na druhou stranu je ale jejich konstrukce mnohem složitější. Zatímco zkonstruovat lineární zdroj zvládne i šikovnější amatér, u spínaných zdrojů tomu tak není.

Jsou složeny ze vstupního usměrňovače. Na ten nejsou kladeny vysoké požadavky, protože pracuje na frekvenci 50 Hz. Usměrněné napětí se vyhladí filtrem. Ten musí odfiltrovat síťovou frekvenci. Vyhlazené napětí je rozkmitáno elektronickým spínačem. To je pak přivedeno na transformátor, kde probíhá samotná transformace napětí. Transformované napětí stačí už jen usměrnit usměrňovačem. Na ten jsou zde kladeny podstatně vyšší požadavky, protože napětí, které usměrňuje má od 20 kHz do 1 MHz. Pak stačí už jen signál vyfiltrovat výstupním filtrem. Jelikož pracuje na vysokém kmitočtu, není potřeba, aby dosahoval prvotřídních parametrů, jak se lze dočíst ve [3].

Bylo řečeno, že obvod je rozkmitán spínačem. Nyní si ukážeme, jak pracuje jeho řídicí zpětnovazební obvod. Ten snímá napětí na výstupu spínaného zdroje a v zesilovači odchylky ho porovnává s referenčním napětím. Referenční napětí se získává z odporového děliče připojeného na výstup zdroje. Zesilovač odchylky je připojen na vstup PWM. Na druhý vstup PWM je připojen oscilátor. PWM tedy porovnává trojúhelníkový signál z oscilátoru se signálem ze zesilovače odchylky. Na základě porovnávání těchto dvou signálů se tvoří pulzy, které řídí již zmíněný spínač.

Je-li napětí trojúhelníkového oscilátoru větší, než napětí ze zesilovače odchylky, je na výstupu z PWM signál, který sepne spínač. Pokud je ale napětí z oscilátoru menší, pak na výstupu z PWM je nulový signál a spínač je rozepnut. Tyto dva děje se neustále opakují. Délka celého děje, ale i kladného a záporného pulsu se mění podle zatížení, ale i podle vstupního napětí. Výstupní napětí tedy nemá konstantní frekvenci a je tudíž obtížnější ho vyfiltrovat.

### **2.2 Regulace osvětlení**

Regulace osvětlení s použitím PWM je téměř bezztrátová. Regulace totiž pracuje na principu změny střidy výstupního napětí. To má vždy buď jen plné napájecí napětí, nebo nulové napětí. Na koncovém tranzistoru tudíž vznikají jen minimální ztráty způsobené překlápěním

z jednoho stavu do druhého.

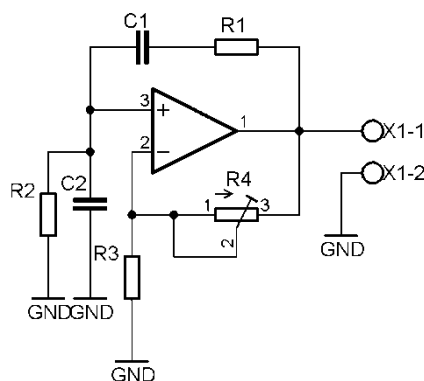
Samotná regulace se provádí přivedením stejnosměrného napětí na vstup PWM. Velikost toho vstupního napětí je možno nastavovat např. potenciometrem. Vstupní obvod PWM by měl mít co největší vstupní odpor, aby potenciometrem tekla jen minimální proud a nevznikaly na něm ztráty. Toto požadované napětí se v PWM porovnává s trojúhelníkovým napětím. Na základě toho porovnání vzniká obdélníkový signál se střídou, která je úměrná velikosti vstupního stejnosměrného napětí.

Tento obdélníkový signál je přiveden na elektronický spínač. Spínač připojuje a odpojuje zdroj světla od jeho napájecího napětí podle rytmu, který udává výstupní napětí PWM. Pro tuto regulaci lze tedy použít jen zdroje světla, které lze rytmicky připojovat a odpojovat od zdroje, jako jsou například žárovky či výkonové LED diody. Pochopitelně je nutno použít frekvenci regulace dostatečně vysokou, aby lidské oko nevnímalo blikání. Tento požadavek je zvlášť důležitý u LED diod, které jsou schopny se rozsvítit a zhasnout téměř okamžitě, narozdíl od žárovek, které se rozsvítí až s nažhavením vlákna, k čemuž je zapotřebí určitý čas.

### 3 NÁVRH A REALIZACE ZDROJE SIGNÁLU, POUŽITELNÉHO V LABORATORNÍ VÝUCE NA ZÁKLADĚ POKYNNŮ VEDOUcíHO BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tato kapitola se zabývá návrhem a realizací zdroje PWM signálu. Jsou navrženy jednotlivé celky, návrh kompletního zařízení a realizace.

#### 3.1 Wienův oscilátor



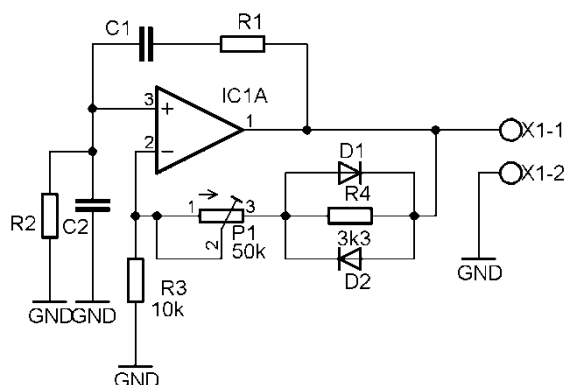
Obr.3.1. Wienův oscilátor

Bylo zapotřebí zrealizovat zdroj sinusového signálu. K tomu bylo použito Wienova oscilátoru. Ukázalo se, že Wienův oscilátor je ve své základní podobě (Obr.3.1.) v praxi nepoužitelný. I při nepatrné změně záporné zpětné vazby dojde buď k velkému rozkmitu a tím i ke zkreslení průběhu, nebo se naopak vůbec nerozkmitá. Proto je nutno amplitudu stabilizovat. Původně byla plánována stabilizace skrze žárovku. Toto zapojení bylo ale neúspěšné. V literatuře se uvádí, že výstupní proud současných operačních zesilovačů je asi 50 mA, ale žárovka potřebuje ke stabilizaci alespoň 70 mA. Proto stabilizace žárovkou dnes u běžných operačních zesilovačů není možná. Používala se v dřívějších dobách, kdy měly operační zesilovače vyšší výstupní proud (ale také vyšší zkreslení). Proto bylo nutno hledat jiný způsob stabilizace. V [1] se uvádí stabilizace dvěma antiparalelně zapojenými diodami (Obr.3.1.). Toto zapojení se ukázalo jako dostačující, lze již dosáhnout požadovaného zesílení ručním pootočením potenciometru.

Autor ale neuvádí jaké diody pro stabilizaci použít. Pro nalezení optimálních diod byly použity usměrňovací diody 1N4007 a schottkyho diody BAT48. Ukázalo se, že usměrňovací diody dosáhly kvalitnější stabilizace, proto byly vybrány jako vhodnější.

Požadavek vedoucího bakalářské práce byl, aby byla možná změna frekvence. Ta je ale u Wienova oscilátoru realizovatelná velice obtížně, protože jak již bylo zmíněno výše, se změnou frekvence se mění i amplituda. Tomuto faktu nezabránily ani stabilizační diody. Ty závislost frekvence na amplitudě pouze zpomalily. Nakonec bylo přistoupeno ke skokové

změně frekvence. To bylo realizováno třemi na sobě nezávislými Wienovými generátory a trojpolohovým přepínačem, kterým je možno vybrat výstupní sinusový signál z kteréhokoli ze třech oscilátorů. Oscilátory pracují na frekvenci 100 Hz, 500 Hz a 1 kHz.



Obr.3.2. Wienův oscilátor se stabilizačními diodami (vychází z [1])

Výpočet kladné zpětné vazby pro frekvenci 100 Hz ( $C = C_1 = C_2$ ,  $R = R_1 = R_2$ ):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} [Hz] \quad (3.1.)$$

$$f_0 C = \frac{1}{2\pi R}$$

$$C = \frac{1}{2\pi R f_0} [F] \quad (3.2)$$

$$R = 4,7 \text{ k}\Omega \text{ (zvoleno)}$$

$$C = \frac{1}{2\pi 4700 * 100} = 338 \text{ nF} \doteq 330 \text{ nF}$$

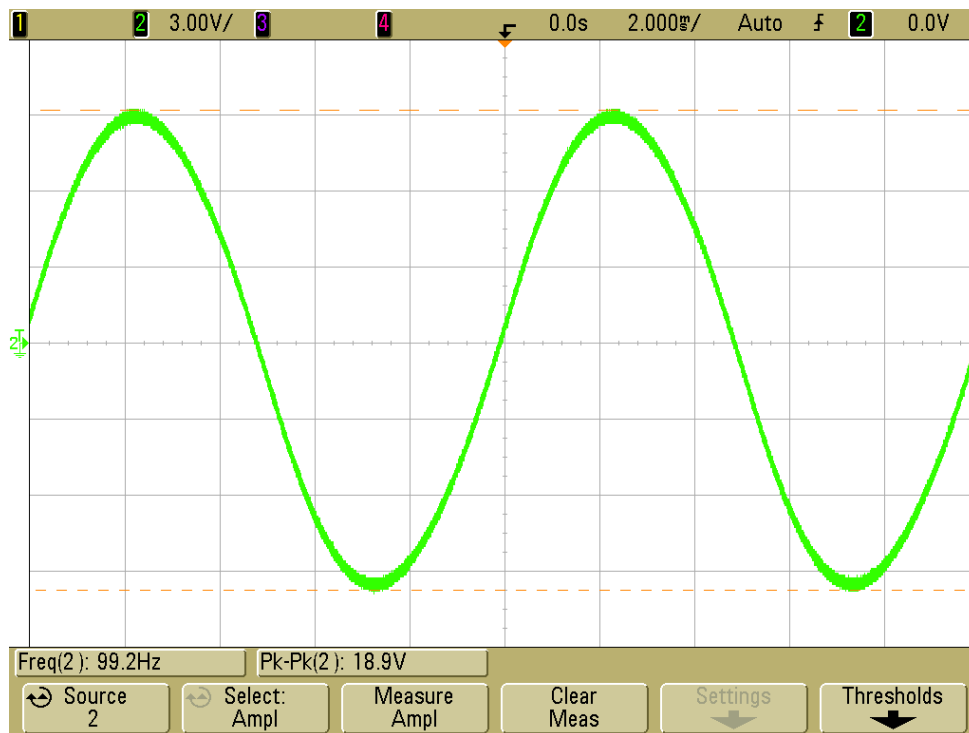
Hodnoty prvků v záporné zpětné vazbě byly rovněž převzaty z [1] a jsou nezávislé na kmitočtu oscilátoru. Jejich hodnoty jsou:

$$P_1 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_{30} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_{31} = 3,3 \text{ k}\Omega$$

Oscilátory sinusového signálu byly použity tři. Kromě výše zmíněného s frekvencí 100 Hz, to jsou další dva s frekvencemi 500 Hz a 1 kHz.



Obr.3.3. Reálný růběh oscilátoru s frekvencí 100 Hz

Výpočet kladné zpětné vazby oscilátoru s frekvencí 500 Hz:

Tentokrát byl zvolen opačný postup, než v předchozím výpočtu. Zvolena byla hodnota kondenzátoru a hodnota rezistoru byla dopočtena.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} [Hz]$$

$$f_0 R = \frac{1}{2\pi C}$$

$$R = \frac{1}{2\pi C f_0} [\Omega] \quad (3.3)$$

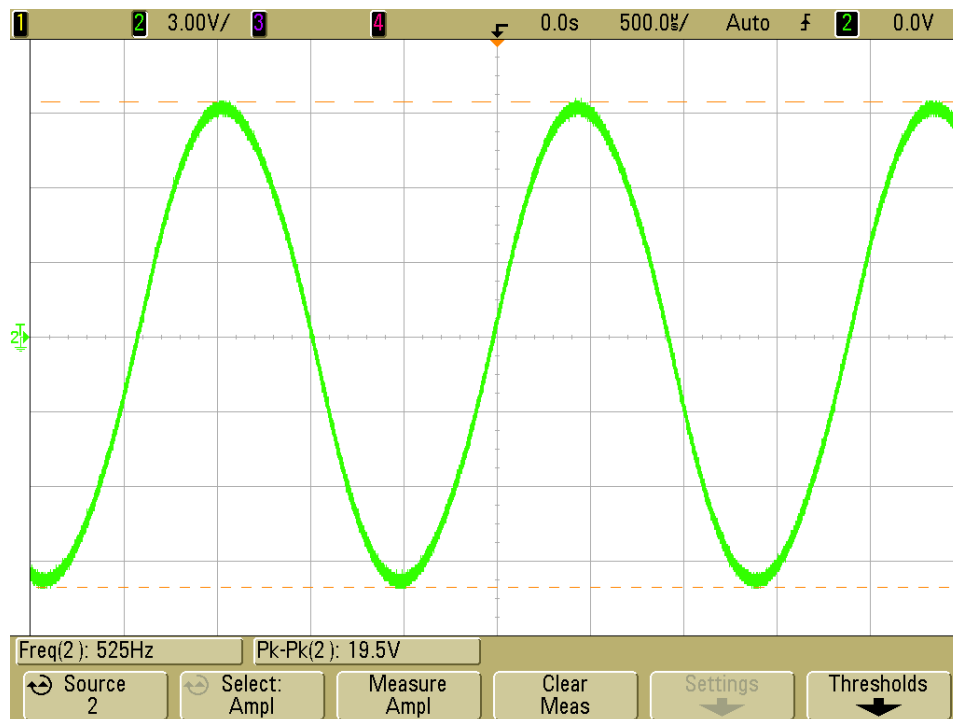
$$C = 4,7 \text{ nF (zvoleno)}$$

$$R = \frac{1}{2\pi 4,7 * 10^{-9} * 500} = 67\,725 \, \Omega \doteq 68 \text{ k}\Omega$$

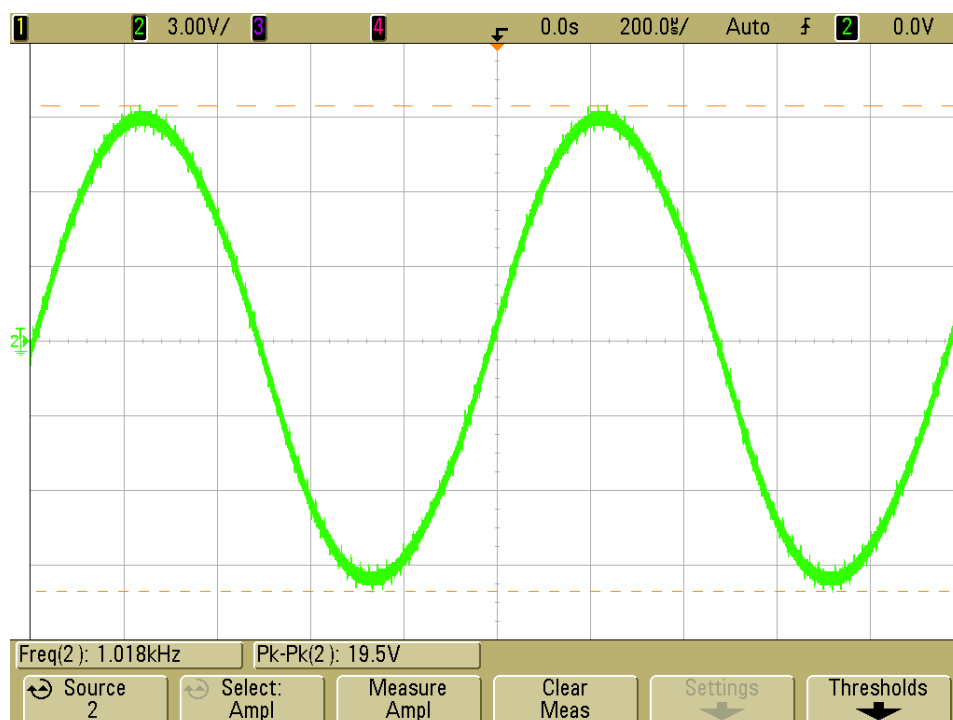
Výpočet kladné zpětné vazby generátoru s frekvencí 1 kHz byl obdobný:

$$C = 3,3 \text{ nF (zvoleno)}$$

$$R = \frac{1}{2\pi 3,3 * 10^{-9} * 1000} = 48\,228 \, \Omega \doteq 47 \text{ k}\Omega$$



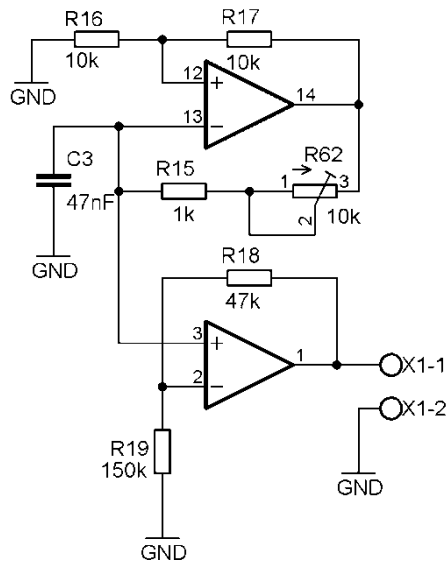
*Obr.3.4. Reálný průběh oscilátoru s frekvencí 500 Hz*



*Obr.3.5. Reálný průběh oscilátoru s frekvencí 1 kHz*

### 3.2 Generátor trojúhelníkového signálu

Generátor trojúhelníkového signálu hraje v PWM velkou roli. Je s ním porovnáván vstupní signál. Pro realizaci generátoru bylo použito schéma na Obr. 3.6. Toto zapojení lze použít i jako generátor obdélníkového signálu pokud jako výstup použijete výstup z prvního operačního zesilovače. Ten pro svou práci používá kondenzátor, který se periodicky nabíjí a vybíjí. Proto jako výstup bylo zvoleno napětí na kondenzátoru. Při vhodné volbě obvodových prvků lze na kondenzátoru dosáhnout trojúhelníkových kmitů s relativně lineární hranou. Protože se výpočty ukázaly jako velice nepřesné, byly hodnoty prvků zvoleny na základě testování různých hodnot, ze kterých byla vybrána neoptimálnější. Výstupní napětí na kondenzátoru bylo 7,6 V, proto bylo nutno hodnotu napětí zvýšit operačním zesilovačem. Zapojení bez invertujícího zesilovače pochází z [2]. Nastavením potenciometru  $R_{62}$  lze nastavit frekvenci od 737 Hz do 7,56 kHz.



Obr.3.6. Schéma generátoru trojúhelníkového signálu.

Výpočet neinvertujícího zesilovače:

$$U_{OUT} = U_{IN} \left( 1 + \frac{R_{18}}{R_{19}} \right) [V] \quad (3.4.)$$

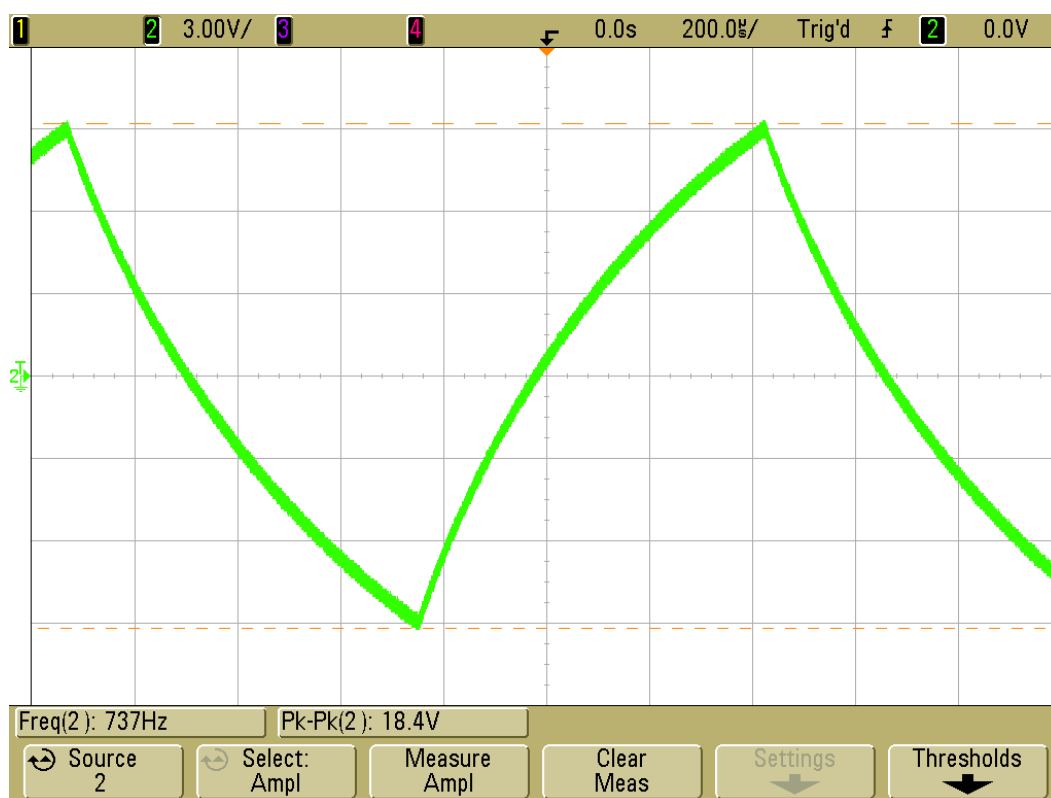
$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 1 + \frac{R_{18}}{R_{19}}$$

$$R_{19} = 150 \text{ k}\Omega \text{ (zvoleno)}$$

$$R_{18} = R_{19} \left( \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} - 1 \right) [\Omega] \quad (3.5.)$$

$$R_{18} = 150 * 10^3 \left( \frac{10}{7,6} - 1 \right) = 47\,368 \, \Omega \doteq 47 \text{ k}\Omega$$





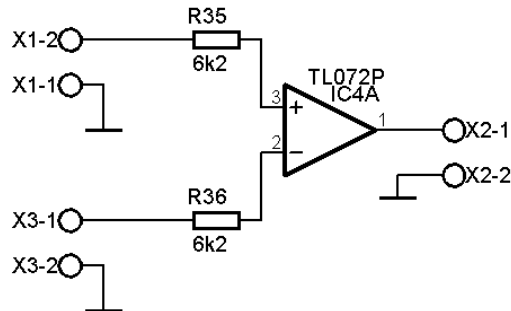
Obr.3.7. Trojúhelníkový průběh generátoru na nejnižším kmitočtu 737 Hz



Obr.3.8. Trojúhelníkový průběh generátoru na nejvyšším kmitočtu 7,56 kHz

### 3.3 Bipolární vyhodnocení PWM

Pro bipolární vyhodnocení byl použit operační zesilovač v zapojení jako komparátor. Ten porovnává signál z generátoru trojúhelníku se signálem z generátoru sinu. Do kladného vstupu je přiveden sinusový signál a do záporného vstupu trojúhelníkový. Před vstupy jsou zařazeny rezistory o hodnotě 6,2 k $\Omega$ . Výstup z komparátoru už není nikterak upravován. Přepíná tudíž mezi hodnotami +15 V a -15 V. Ve snaze docílit velké úrovně promodulování není v komparátoru zařazen histerezní rezistor, aby se projeví i sebemenší rozdíly napětíových úrovní.



Obr.3.9. Bipolární vyhodnocení PWM modulátoru

### 3.4 Unipolární vyhodnocení PWM

Zapojení unipolárního vyhodnocení PWM je mnohem složitější než u bipolárního zapojení vyhodnocení PWM. Vstupní sinusový signál se na vstupu obvodu rozdělí na kladnou a zápornou půlvlnu. Tady dvě půlvlny se porovnávají s trojúhelníkovým signálem zvlášť a poté jsou na výstupu opět sečteny. Aby se mohl trojúhelníkový signál porovnávat se sinusovým, bylo ho nutno zmenšit na polovinu původní velikosti a přičíst stejnosměrnou složku (u vyhodnocování kladné půlvlny se přičítá kladná stejnosměrná složka, u záporné půlvlny záporná stejnosměrná složka). Jelikož sinusový signál má hodnotu amplitudy 10 V, je nutno přičítat, respektive odečítat k trojúhelníkovému signálu stejnosměrnou složku o velikosti +5 V, resp. - 5 V.

#### 3.4.1 Vstupní operační usměrňovač

Jak již bylo zmíněno výše, je potřeba vstupní sinusový signál rozdělit na jeho kladnou a zápornou část. Aby bylo rozdělení co nejkvalitnější, tedy aby došlo k jeho rozdělení i v malých úrovních napětí (v oblasti přechodu z jedné polarity do druhé polarity) byl k tomu použit operační usměrňovač (Obr.3.10.). Ten má ve zpětných vazbách použity Schottkyho diody. Ty se vyznačují menším prahovým napětím než klasické diody a tudíž také přispívají ke zkvalitnění průběhů. Operační zesilovač má dvě záporné zpětné vazby. V jedné z nich je dioda pólována kladně, ve druhé z nich záporně. Z diod se odebírá výstupní signál. Za diodami jsou zapojeny rezistory  $R_{38}$  a  $R_{39}$ , které ovlivňují celkové zesílení operačního zesilovače. Kladný vstup je zapojen na zem. Na záporný vstup je přiveden vstupní sinusový signál přes vstupní rezistor  $R_{37}$ . Jedná se o invertující zapojení, tudíž bude výstup invertován oproti vstupu, což je patrné i z Obr.3.11.

Pro kladnou půlvlnu použijeme vztah

$$U_{IN} = -\left(\frac{R_{39}}{R_{37}}\right) U_{OUT} \quad (3.6.)$$

dosadíme hodnoty rezistorů

$$U_{IN} = -\left(\frac{6200}{6200}\right) U_{OUT}$$

$$U_{IN} = -U_{OUT}$$

Z čehož je patrné, že výstupní napětí bude mít stejnou hodnotu jako vstupní, jen s opačným znaménkem.

Pro zápornou půlvlnu použijeme vztah

$$U_{IN} = -\left(\frac{R_{38}}{R_{37}}\right) U_{OUT}$$

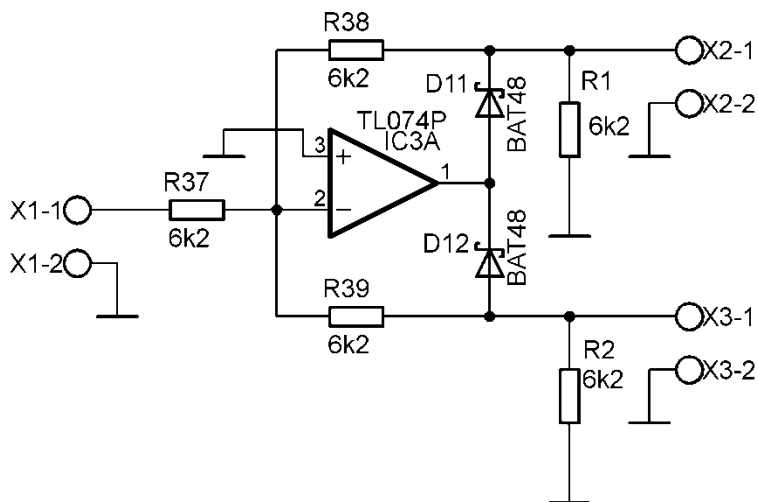
Po dosazení dostaneme

$$U_{IN} = -\left(\frac{6200}{6200}\right) U_{OUT}$$

$$U_{IN} = -U_{OUT}$$

Zde je rovněž patrné, že výstupní napětí bude mít stejnou hodnotu jako vstupní, která bude invertována.

Aby se diody otevíraly, je nutno aby jimi protékal proud. Proto jsou mezi výstupy usměrňovače a zem připojeny rezistory  $R_1$  a  $R_2$  o hodnotě  $6,2 \text{ k}\Omega$ , které zajišťují průtok proudu diodami.



Obr.3.10. Operační usměrňovač kladného a záporného signálu



Obr.3.11. Vstupní signál (žlutý) je invertován a rozdělen na kladnou část (zelený) a zápornou část (fialový).

### 3.4.2 Zmenšení trojúhelníkového signálu a přičtení stejnosměrné složky.

Aby bylo možno trojúhelníkový signál porovnat s půlnovou sinusového signálu, je zapotřebí ho nejprve zmenšit o polovinu. K tomu slouží operační zesilovač IC2B, který je zapojený jako invertující zesilovač. Jeho zesílení se určí vztahem

$$A = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad (3.7.)$$

Vyjádříme  $U_{OUT}$

$$U_{OUT} = A * U_{IN} \quad (3.8.)$$

Po dosazení dostáváme

$$U_{OUT} = 0,5 * 10 = 5 \text{ V}$$

Nyní použijeme vztah pro vstupní napětí invertujícího zesilovače

$$U_{OUT} = -\left(\frac{R_{11}}{R_{12}}\right) U_{IN}$$

$$R_{12} = 10 \text{ k}\Omega \text{ (zvoleno)}$$

Po vyjádření  $R_{11}$

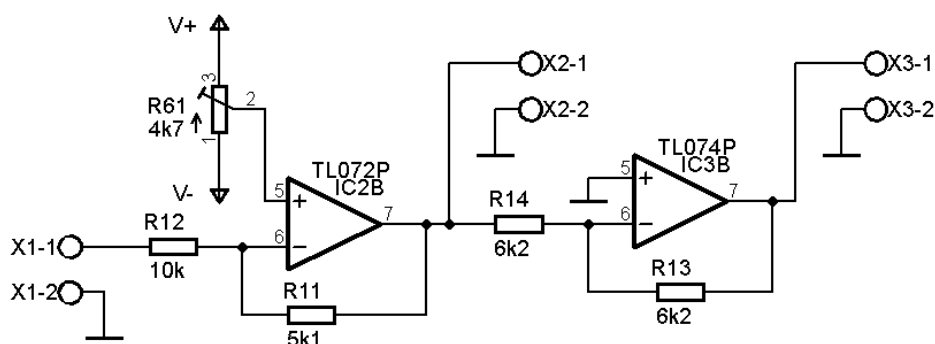
$$R_{11} = \frac{R_{12} * U_{OUT}}{U_{IN}}$$

Po dosazení dostaneme

$$R_{11} = \frac{10\,000 * 5}{10} = 5000\,\Omega \doteq 5,1\,\text{k}\Omega$$

Ve snaze co nejpřesnějšího zesílení byla hodnota  $5\,\text{k}\Omega$  zaokrouhlena na  $5,1\,\text{k}\Omega$ , což je nejbližší hodnota rezistorů řady E24

Relativně přesnější možnost je použít paralelní, resp. sériové zapojení dvou ze tří stejných rezistorů. Pochopitelně je pak nutno použít o jeden rezistor více než ve variantě v předchozím odstavci. Proto bylo od této možnosti ustoupeno.



Obr.3.12. Schéma zapojení obvodu, který zmenšuje signál a přičítá k němu stejnosměrnou složku

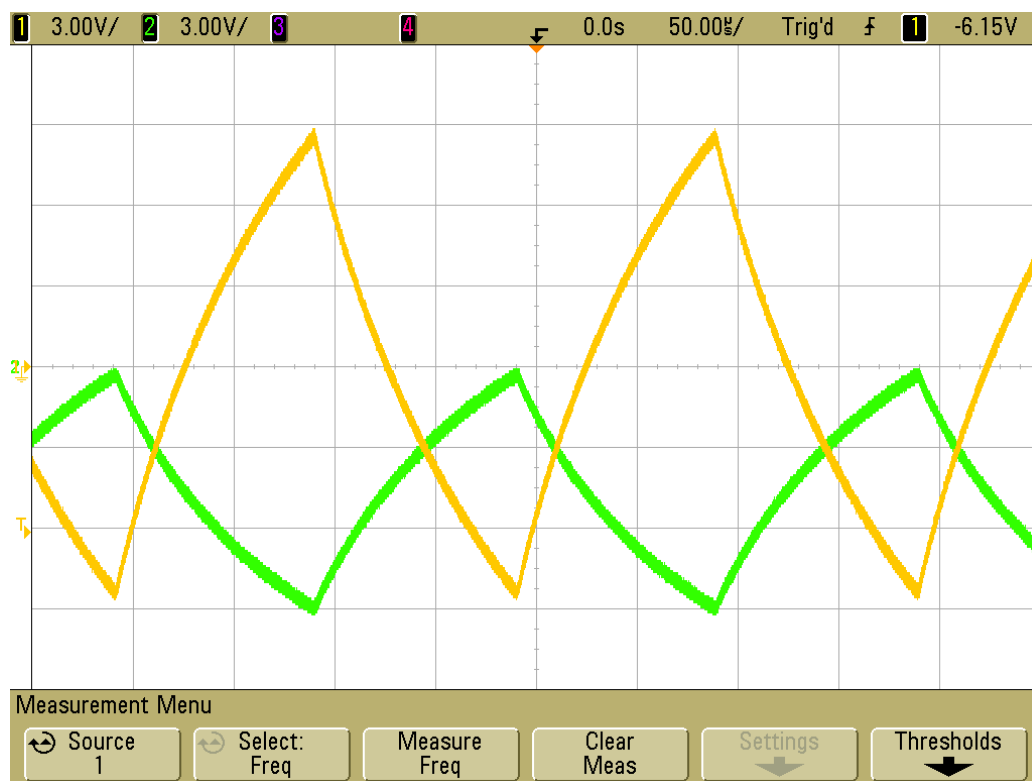
Kromě zmenšení o polovinu je nutno i přičtení stejnosměrné složky. Tuto operaci zajišťuje rovněž operační zesilovač IC2B ve spolupráci s potenciometrem. Jeden konec dráhy potenciometru je připojen na kladné napájecí napětí, druhý konec dráhy potenciometru je připojen na záporné napájecí napětí. Jezdec potenciometru je připojen na kladný vstup operačního zesilovače. Jedná se o odporový dělič. Vzhledem k velkému vstupnímu odporu operačního zesilovače můžeme uvažovat, že se jedná o nezátížený odporový dělič. Tudiž hodnota celkové dráhy potenciometru nemá vliv na jeho funkci. Ta má vliv jen na proud protékající z jednoho konce dráhy na druhý konec. Je tedy nutno zvolit takovou hodnotu, aby se potenciometr výkonově nepřetěžoval. Zde je zvolen potenciometr o hodnotě  $4,7\,\text{k}\Omega$ . Jeho ztrátový výkon vypočteme ze vztahů:

$$U = 30\,\text{V} \text{ (napájecí napětí } U_{pp})$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{30}{4700} = 6,4\,\text{mA}$$

$$P = U * I = 30 * 0,0064 = 0,192\,\text{W}$$

Ztrátový výkon  $0,192\,\text{W}$  by neměl běžný typ potenciometru poškodit.



Obr.3.13. Původní signál (žlutý) je zmenšen o polovinu, invertován a je k němu přičtena záporná stejnosměrná složka (zelený).

Posunutím trojúhelníkového signálu o stejnosměrnou složku jsme umožnili jeho porovnání s jednou půlvlnou sinusového signálu. Aby bylo možno porovnat i druhou půlvlnu sinusového signálu, je zapotřebí posunutý trojúhelníkový signál invertovat. Tím se zajistí posunutí v obou směrech. (Pokud byla přičtena jedna polarita stejnosměrného signálu, invertováním získáme i druhou polaritu, která se bude porovnávat s druhou půlvlnou sinusovky).

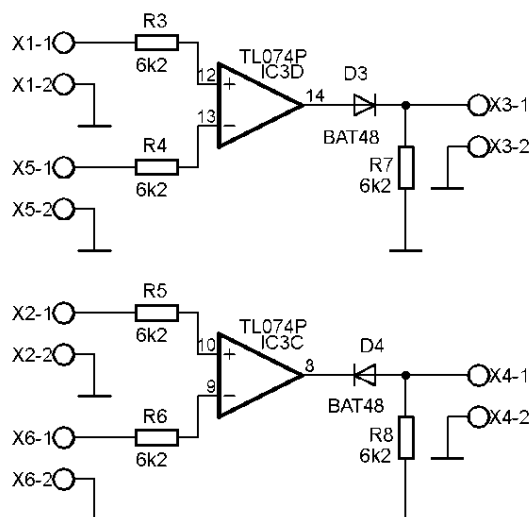
Tuto operaci zajišťuje operační zesilovač IC3B, jak je patrné na obrázku Obr.3.12. Tento operační zesilovač je zapojen jako invertující. Protože jeho funkce je jen invertovat a nikoli zesilovat, jsou jeho oba rezistory stejné. To je patrné ze vztahu:

$$U_{OUT} = -\left(\frac{R_{13}}{R_{14}}\right)U_{IN} = -\left(\frac{6200}{6200}\right)U_{IN} = -U_{IN}$$

Jelikož na výstupu tohoto operačního zesilovače nemá být přičtena žádná stejnosměrná složka, je kladný vstup připojen na zem.

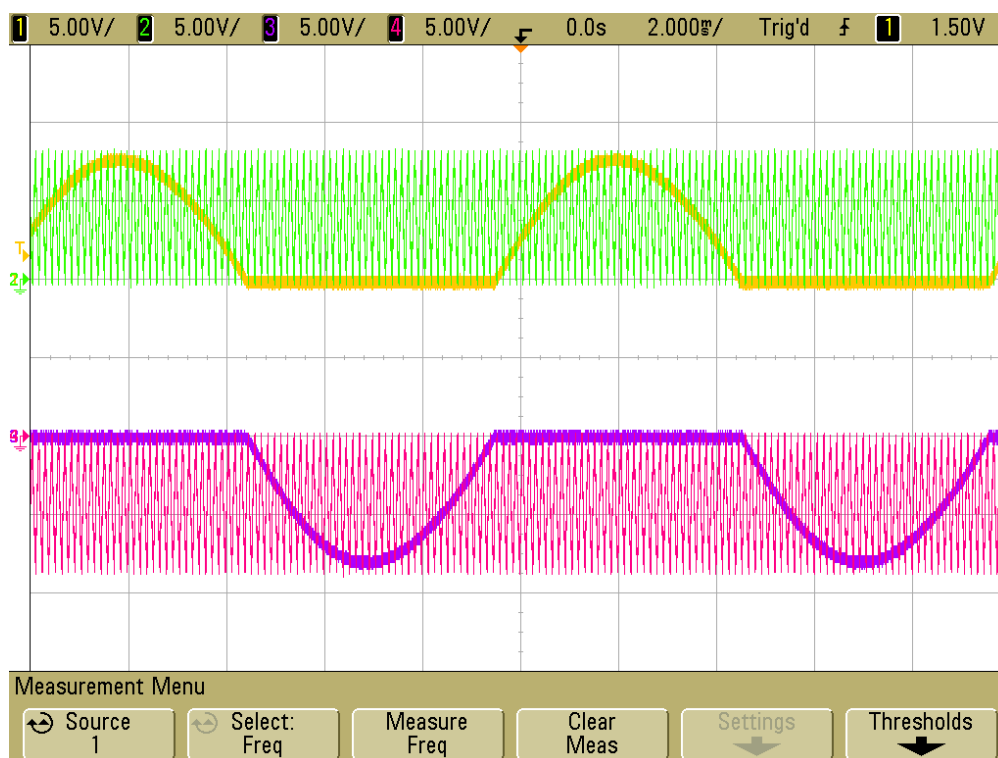
### 3.4.3 Komparátory

Kladná sinusová půlvlna se musí porovnat s trojúhelníkem posunutým o kladnou stejnosměrnou složku. K tomu slouží operační zesilovač IO3D zapojený jako komparátor na Obr.3.14. Na kladný vstup komparátoru se přivede kladná půlvlna sinusového signálu, na záporný vstup trojúhelníkový signál s přičtenou kladnou stejnosměrnou složkou. Rezistory na vstupu komparátoru musí mít stejnou hodnotu odporu. Byly vybrány rezistory s hodnotou 6,2 k $\Omega$ . Obdobně jako komparátor použitý pro bipolární vyhodnocení PWM i tento komparátor nemá kvůli zvýšení přesnosti histerezní rezistor. Výstup z běžného zapojení komparátoru dosahuje pouze dvou úrovní, a to kladné a záporné saturace. Ale protože se jedná o unipolární pulsně šířkovou modulaci, je zapotřebí, aby výstupní signál dosahoval vždy jen jedné polaritě napětí. To je zajištěno diodou D3, která propouští jen kladný proud. Dioda byla zvolena typu BAT48. Jedná se o Schottkyho diodu, která má jen malý úbytek napětí při otevření, tím je částečně eliminovaný problém otevření diody i při malém napětí. A jelikož je to Schottkyho dioda, má i rychlou komutaci – výrobce udává 10 ns. Tato vlastnost také pozitivně ovlivní modulaci. Aby se dioda otevřela, je nutné, aby jí protékal proud. To zajišťuje rezistor R7, přes který protéká proud do země.

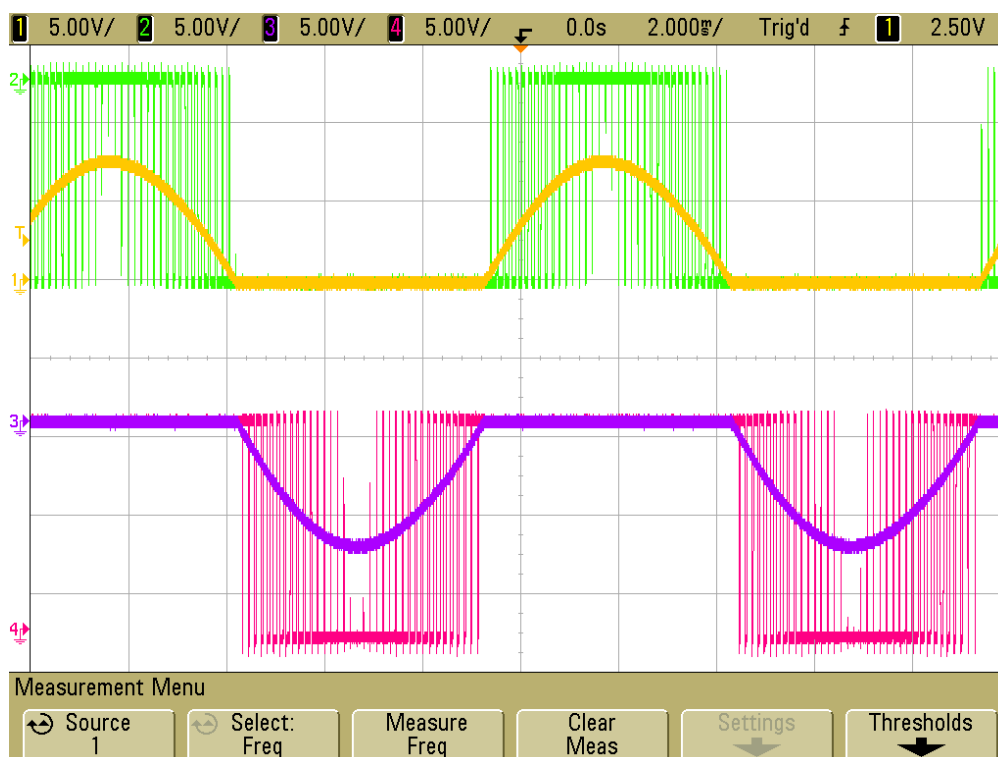


Obr.3.14. Komparátory kladného a záporného signálu

U porovnávání záporné půlvlny s trojúhelníkovým signálem s přičtenou zápornou stejnosměrnou složkou je tomu podobně jako v předešlém odstavci. Jako komparátor je použit operační zesilovač IC3C. Na jeho kladný vstup je přivedena záporná část půlvlny sinusového průběhu, na záporný vstup trojúhelníkový signál s přičtenou zápornou stejnosměrnou složkou. Na vstupy komparátoru jsou zapojeny předřadné rezistory o hodnotě 6,2 k $\Omega$ . Na výstup komparátoru je rovněž připojena Schottkyho dioda, tentokrát je ale záporně pólována. Propouští tedy jen záporný proud. Aby jí proud protékal, je rezistorem R8 o hodnotě 6,2 k $\Omega$  připojena na zem. Funkce komparátorů je zřejmá z Obr.3.15 a Obr.3.16.



Obr.3.15. Signály přiváděné na vstupy komparátorů. Žlutý a zelený signál je přiváděn na jeden komparátor, fialový a červený na druhý komparátor.



Obr.3.16. Žlutý a fialový průběh jsou signály na vstupu komparátorů. Zelený a červený signál je odebrán z výstupů komparátorů, na které je připojena dioda.



### 3.4.4 Sumátor

Signály, které dostáváme z obou komparátorů za diodami se sčítají operačním zesilovačem zapojeným jako sumátor, který je na Obr.3.17. Aby se oba signály ovlivňovaly co nejméně, jsou ke kladnému vstupu sumátoru připojeny přes rezistory  $R_9$  a  $R_{10}$  o hodnotě 150 k $\Omega$ . Nicméně i přes tuto velkou hodnotu odporu dostáváme na vstupu sumátoru signál, který má maximální hodnotu napětí 6,5 V, namísto původní maximální hodnoty 14 V, kterou dostáváme z komparátorů. Tento pokles je kompenzován zesílením sumátoru. Ten zesiluje  $U_{IN(max)} = 6,5$  V na  $U_{OUT(max)} = 10$  V. Jeho zesílení je tedy:

$$A = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{10}{6,5} = 1,54$$

Ju nutno vypočítat hodnoty rezistorů tvořící zápornou zpětnou vazbu. Výstupní napětí operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení:

$$U_{OUT} = \left(1 + \frac{R_{34}}{R_{32}}\right) U_{IN}$$

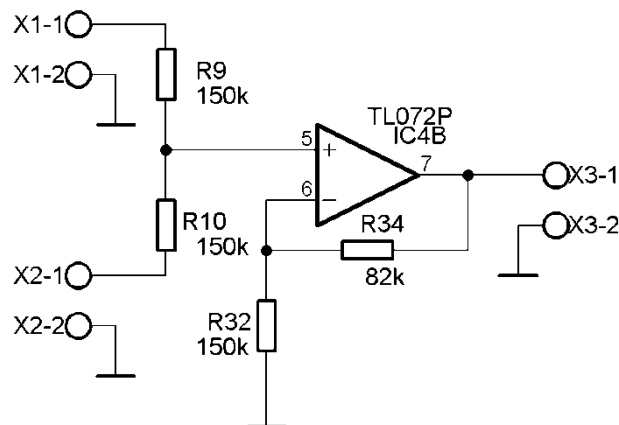
Úpravou rovnice dostáváme:

$$R_{34} = \frac{(U_{OUT} - U_{IN})R_{32}}{U_{IN}} \quad (3.9.)$$

$$R_{32} = 150 \text{ k}\Omega \text{ (zvoleno)}$$

Po dosazení hodnot:

$$R_{34} = \frac{(10 - 6,5)150\,000}{6,5} = 80\,769 \, \Omega \doteq 82 \text{ k}\Omega$$



Obr.3.17. Schéma zapojení sumátoru

Jelikož výběr rezistoru je limitován odporovými řadami, byla hodnota rezistoru  $R_{34}$  zaokrouhlena na hodnotu 82 k $\Omega$ , která je v řadě E12. Zpětně bylo vypočteno zesílení pro  $R_{34}=82$  k $\Omega$ , a to následovně:

Vztah pro výstupní napětí neinvertujícího zesilovače

$$U_{OUT} = \left(1 + \frac{R_{34}}{R_{32}}\right) U_{IN}$$

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 1 + \frac{R_{34}}{R_{32}}$$

Vztah pro zesílení

$$A = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}$$

Matematická úprava

$$A = 1 + \frac{R_{34}}{R_{32}}$$

Dosazení hodnot do vzorce

$$A = 1 + \frac{82\,000}{150\,000} = 1,55$$

Odchylka, která vznikla zaokrouhlením na odporovou řadu je nepatrná.

## 3.5 Konstrukční záležitosti

### 3.5.1 Operační zesilovače

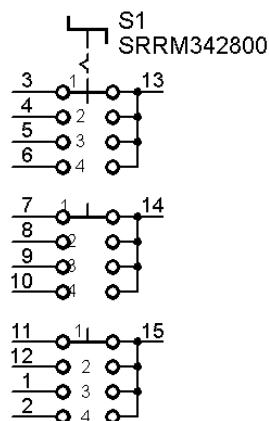
Operační zesilovače použity v této práci jsou TL072CN (dva operační zesilovače v jednom pouzdře DIL8)  
TL074IN (čtyři operační zesilovače v jednom pouzdře DIL16)

Základní parametry těchto operačních zesilovačů, opsané ze [7]:

Maximální napájecí napětí:	+/-18V
Vstupní napětí:	+/-15V
Teplota prostředí:	označení C 0°C až 70°C
	označení I -40°C až 85°C

### 3.5.2 Přepínač sinusových signálů

Bylo zapotřebí si přepínačem vybrat vždy jen jeden ze tří sinusových generátorů. K tomu slouží rotační trojpolohový přepínač. Přepínač použitý v této práci je sice trojpólový, ale využitý je jen jeden pól. Ostatní jsou nezapojeny.

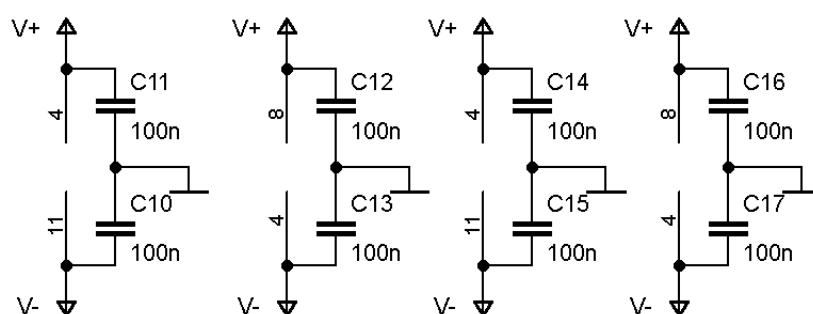


Obr.3.18 Použitá schématická značka přepínače a jeho fyzická podoba.

Pozn.: Ve schématu je zakreslen čtyřpolohový trojpólový přepínač. Je to z důvodu nedostatečných knihoven v programu Eagl. Přepínač použitý ve schématu byl konstrukčně nejpodobnější přepínači fyzicky použitému – ten je trojpolohový trojpólový.

### 3.5.3 Blokovací kondenzátory

Operační zesilovače je vhodné blokovat kondenzátory. V literatuře [1] se uvádí schéma, které je na Obr.3.19. Rovněž autor doporučuje zvolit kapacitu 100 nF. V této práci bylo použito osm svitkových kondenzátorů (ke každému ze čtyř pouzder operačních zesilovačů dva kondenzátory. Jeden na kladné napětí a zem, druhý na záporné napětí a zem). Při navrhování desky plošného spoje byla snaha umístit blokovací kondenzátory co nejbližše pouzdrům operačních zesilovačů, aby blokovaly, pokud možno, co nejlépe.



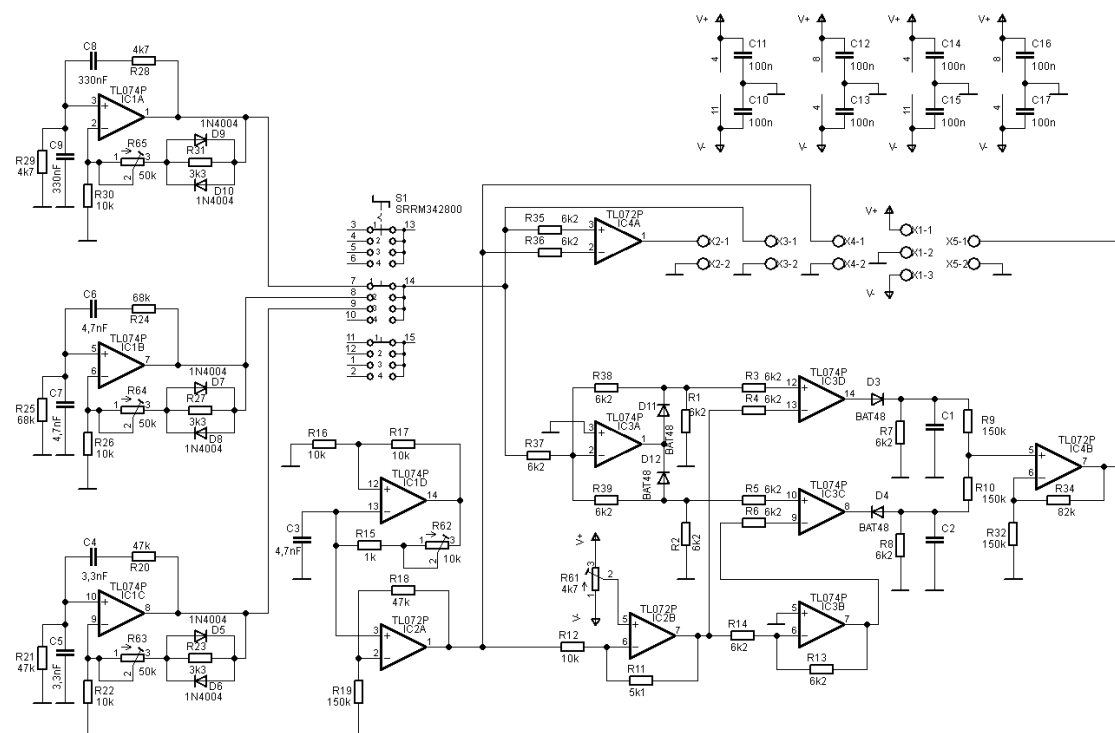
Obr.3.19. Blokování napájecích vývodů operačních zesilovačů proti zemi.

## 3.6 Tvorba celkového zapojení schématu

Jako zdroj sinusového signálu jsou použity tři Wienovy generátory, jejichž rezonanční frekvence jsou 100 Hz, 500 Hz a 1 kHz. K výběru generátoru slouží trojpolohový rotační

přepínač. Jako zdroj trojúhelníkového signálu slouží trojúhelníkový generátor, který je napětově zesílený neinvertujícím zesilovačem. Výstup z generátoru sinusového signálu i trojúhelníkového signálu je přiveden do vyhodnocovací části obvodu. Pro bipolární vyhodnocení je použit komparátor. Signál z jeho výstupu je přiveden na výstupní svorky. Pro unipolární vyhodnocení je použit vyhodnocovací obvod zmíněný výše. Výstupní signál je přiveden na výstupní zdíčky. Pro ilustraci funkce zařízení jsou na výstupní zdíčky vyvedeny i signály z generátoru sinusového signálu a trojúhelníkového signálu. Pro napájení byla použita trojice napájecích zdírek, na které je doporučeno přivést +15V/GND/-15V.

Schéma bylo děláno v programu Eagle a je na Obr.3.20. Výkres schématu je uveden v příloze.



Obr.3.20. Schéma celého obvodu

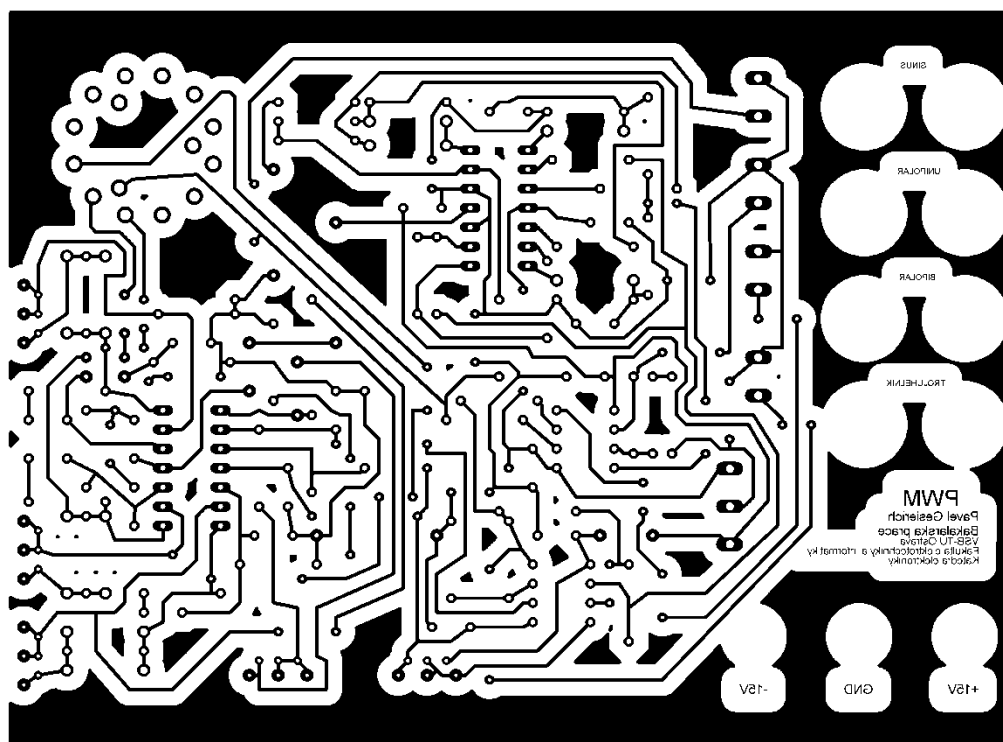
### 3.7 Deska plošných spojů

Deska byla tvořena rovněž v programu Eagle, stejně jako schéma. Při tvorbě byl kladen důraz na minimalizaci, protože velikost desky byla omezená volnou verzí programu. Nebyly použity žádné součástky, které by se tepelně či magneticky ovlivňovaly. Tudiž jediná skutečnost, která nám ovlivňovala umístění součástek, byla snaha o minimalizaci, viz Obr.3.21 a Obr.3.22. Jako operační zesilovač byl dvakrát použit integrovaný obvod TL072 (2xOZ) a dvakrát TL074 (4xOZ). Poblíž napájecích kontaktů jsou umístěny blokovací kondenzátory. Pro snadnou manipulaci s potenciometry byly potenciometry umístěny na okraj desky. Na jednom okraji (na Obr.3.24. vlevo) jsou potenciometry pro nastavení amplitudy Wienových generátorů, na druhém okraji (na Obr.3.24. dole) potenciometry pro nastavení frekvence trojúhelníkového signálu a pro nastavení offsetu (stejnoseměrné složky) trojúhelníkového signálu pro bipolární vyhodnocení.

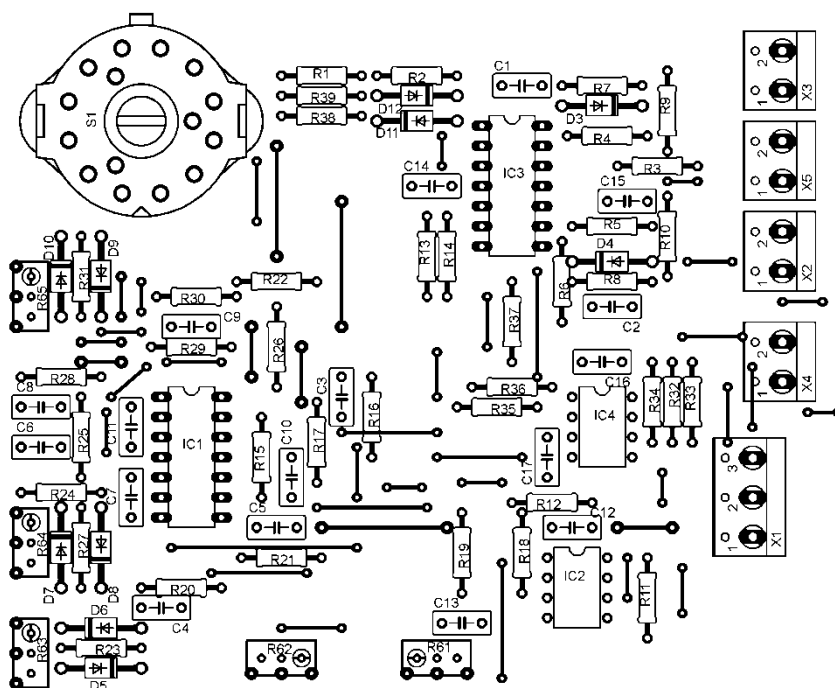
Rovněž i rotační přepínač je umístěn na okraji desky. Na opačném okraji, než ovládací prvky (na Obr.3.24. vpravo) jsou umístěny svory. Čtyři páry menších svorek pro výstupní signály (sinusový, trojúhelníkový, unipolární PWM a bipolární PWM). Červeně jsou označeny živé svorky, černě zemní svorky. Dále na desce jsou tři větší svorky pro napájecí napětí. Červená pro +15V, černá pro zem a modrá pro -15V. U všech svorek je ze strany spojů vyleptané označení svorky, aby se eliminovaly chyby obsluhy. Na desce se rovněž nachází vyleptaný název zařízení (PWM). Pod tímto nápisem je jméno konstruktéra (Pavel Gesierich) a na závěr název školy (VŠB – TU Ostrava, Katedra elektroniky). Spoje ze strany součástek jsou realizovány drátovými propojkami.

Kvůli velké minimalizaci a tedy i úzkým vodivým cestám nebylo leptání desky prováděno ve školní laboratoři, ale bylo zadáno Firmě Sitas v Rožnově pod Radhoštěm. Firma provedla i vyvrtání menších otvorů. Pro rezistory, kondenzátory, diody a drátové propojky byly vyvrtány otvory o průměru 0,8 mm, pro potenciometry a vývody ke svorkám 0,1mm. Větší otvory v desce (pro svorky) byly vyvrtány svépomocí.

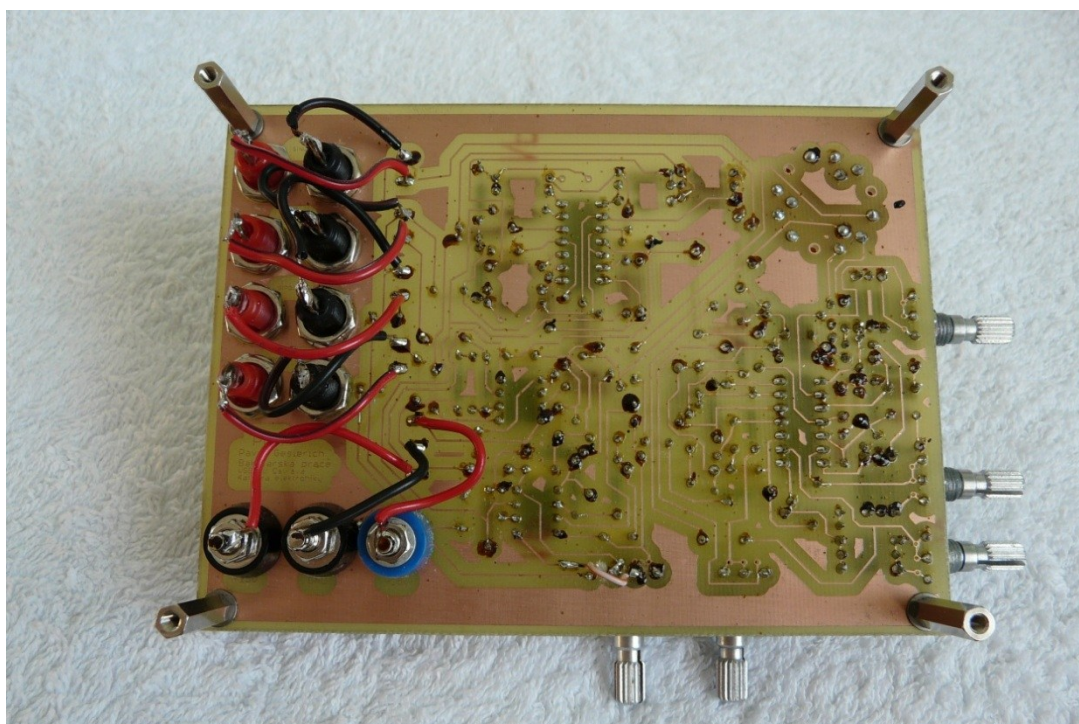
Pájení probíhalo mikropáječkou s měkkou pájkou a kalafunou, Obr.3.23.. Potenciometry a rotační přepínač jsou osazeny přímo na desce. Svorky jsou s deskou spojeny měděnými izolovanými vodiči. Do desky jsou vyvrtány i otvory pro distanční sloupky, které slouží jako nožky.



Obr.3.21. Klišé plošného spoje (pohled ze strany součástek)

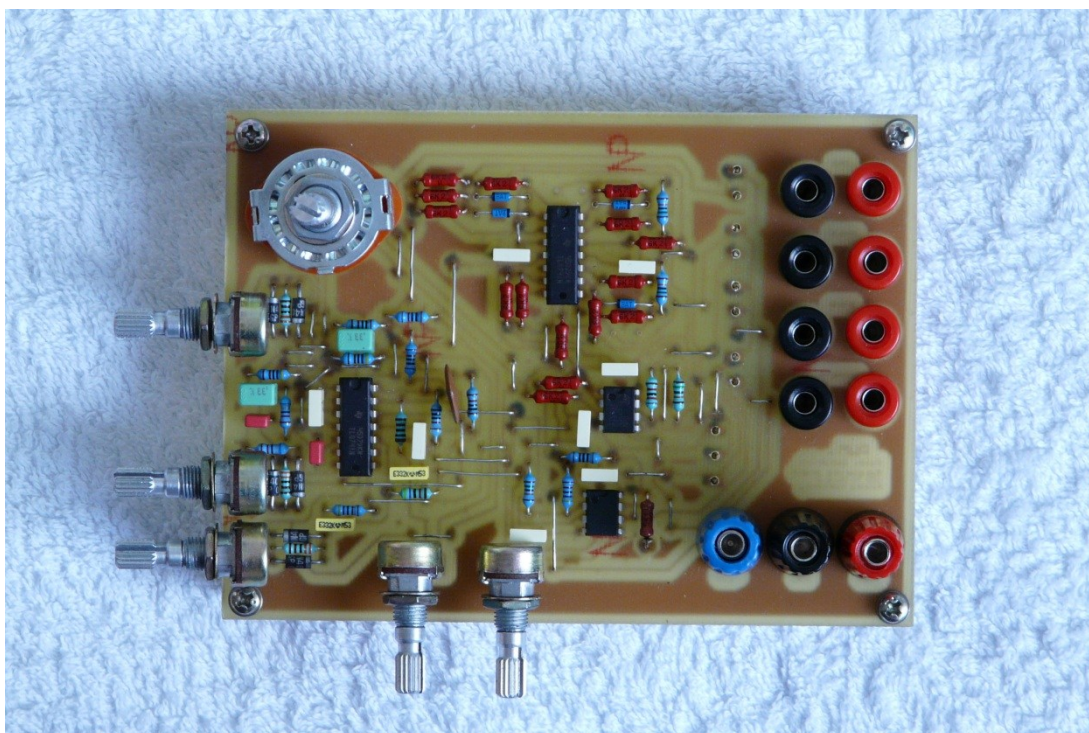


Obr.3.22. Mapa osazení součástek.



Obr.3.23. Hotová deska (strana spojů)





*Obr.3.24. Hotová deska (strana součástek)*

### 3.8 Návod k použití

1) Připojte ke svorkám číslo 1 až 4 osciloskop. Pokud chcete připojit sondy, je vhodné je připojit ze spodní strany desky plošných spojů do místa, kde je připájen vodič.

Dvojice svorek označená na Obr.3.25. číslem 1 je pro výstup sinusového signálu.

Dvojice svorek označená číslem 2 je pro výstup unipolárního PWM.

Dvojice svorek označená číslem 3 je pro výstup bipolárního PWM.

Dvojice svorek označená číslem 4 je pro výstup trojúhelníkového signálu.

2) Na trojici svorek označených číslem 5 připojíme napájecí napětí. +15 V na červenou svorku, zem na černou a -15 V na modrou svorku. Po připojení napájení začíná obvod ihned pracovat.

3) Rotačním přepínačem na Obr.3.26. označeným písmenem F, zvolíme generátor sinusového signálu o frekvenci 100 Hz (poloha vlevo).

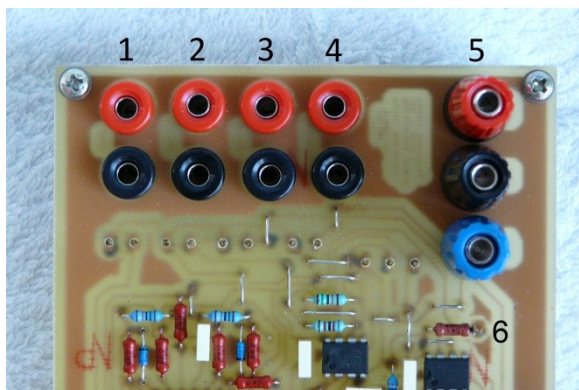
Potenciometrem A nastavíme amplitudu 10 V (případně jinou), kterou sledujeme na osciloskopu.

Přepneme přepínač F na generátor sinusového signálu o frekvenci 500 Hz (poloha uprostřed).

Potenciometrem B nastavíme amplitudu 10 V (případně jinou), kterou sledujeme na osciloskopu.

Přepnem přepínač F na generátor sinusového signálu o frekvenci 1 kHz (poloha

vpravo). Potenciometrem C nastavíme amplitudu 10 V (případně jinou), kterou sledujeme na osciloskopu.



*Obr.3.25. Označení zdířek*

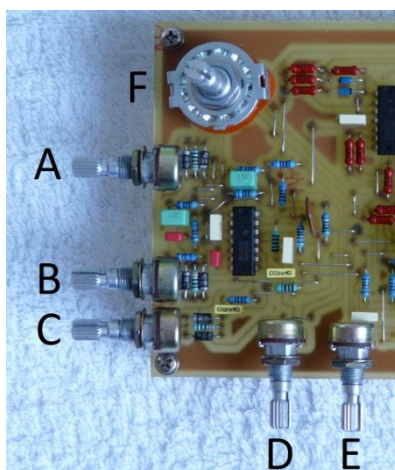
4) Nyní si nastavíme požadovanou frekvenci na zdroji trojúhelníkového signálu potenciometrem. Na Obr.3.26. je tento potenciometr označen písmenem D.

Pokud máme nastavený generátor sinusového i trojúhelníkového signálu, můžeme již pozorovat bipolární výstup PWM na zdířkách číslo 3 (Obr.3.25).

5) Osciloskopem se připojíme na měřící bod, který je umístěn poblíž napájecích svorek a na Obr.3.25. je označen číslem 6. Potenciometrem E nastavíme stejnosměrnou složku v trojúhelníkovém signálu tak, aby se horní část trojúhelníkového průběhu dotýkala nulové úrovně (přičteme cca mínus 2,5 V).

Tím je splněna i poslední podmínka a unipolární PWM se tím stává plně funkční.

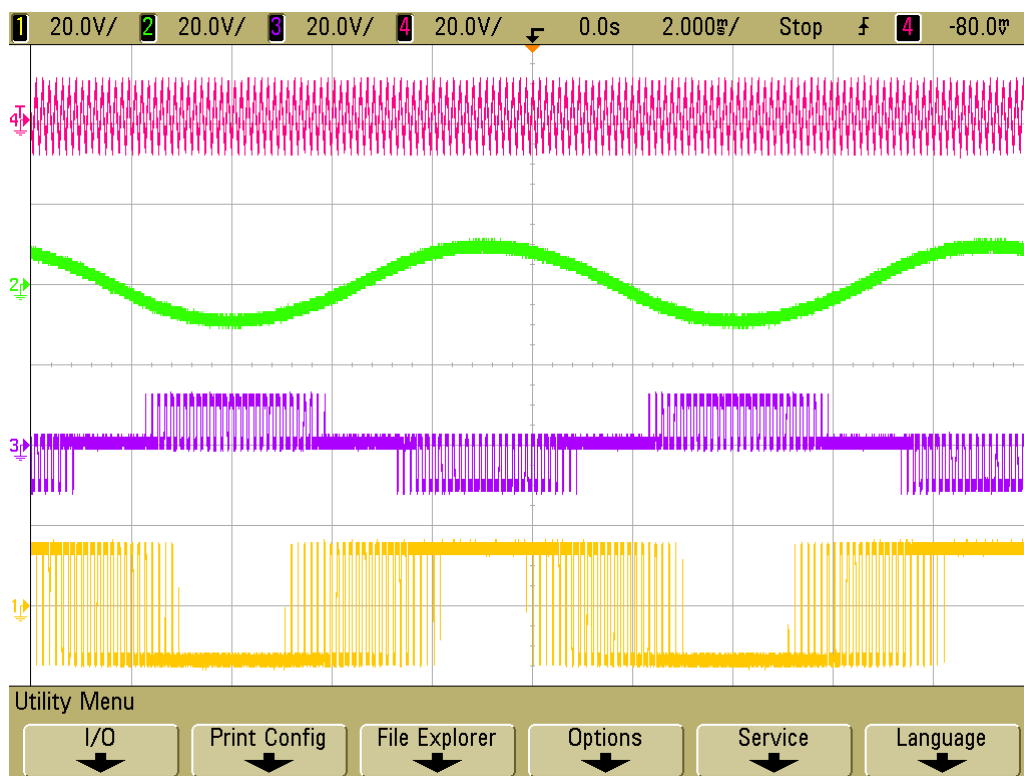
Nyní můžeme přepínat přepínačem F a volit tím různé generátory sinusového průběhu, nebo otáčet potenciometrem D a nastavovat tím různé frekvence trojúhelníkového signálu.



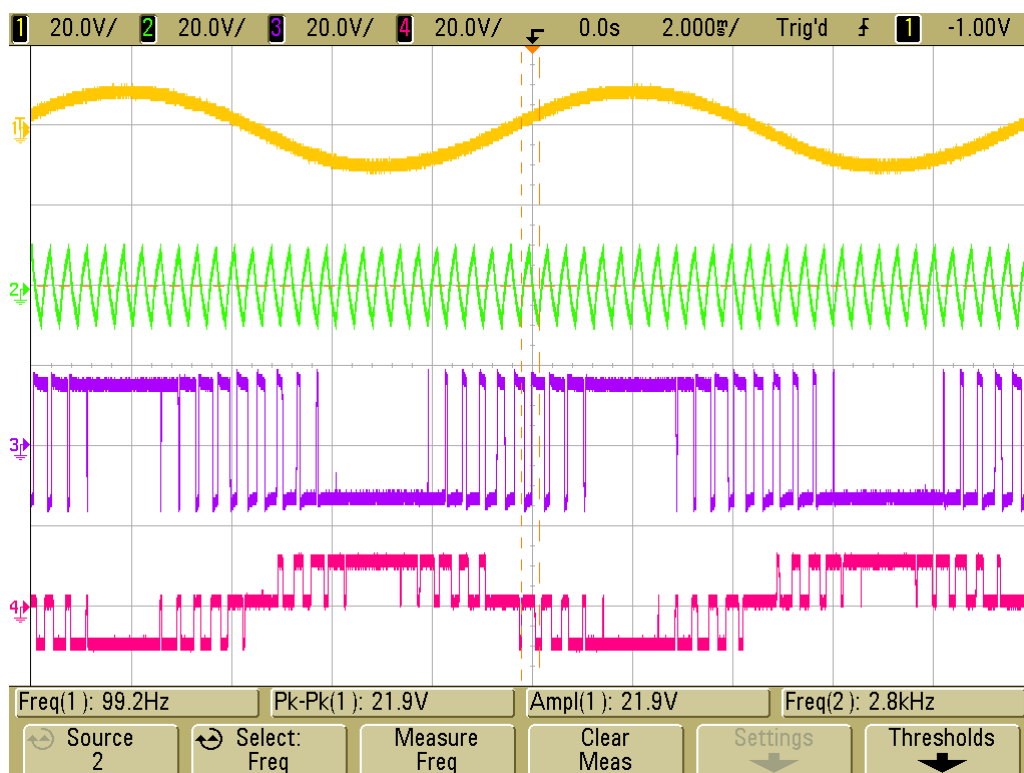
*Obr.3.26 Označení ovládacích prvků*

Pokud uživatel neudělal chybu, či zařízení nevypovědělo službu, budou na výstupních svorkách signály podobné jako na Obr.3.27.





Obr.3.27a. Příklad napěťových signálů odebíraných z výstupních svorek. Červeně je zobrazen trojúhelníkový generátor, zeleně sinusový generátor, fialově unipolární PWM a žlutě bipolární PWM.



Obr.3.27b. Příklad napěťových signálů odebíraných z výstupních svorek. Žlutě je zobrazen sinusový generátor, zeleně trojúhelníkový generátor, fialově bipolární PWM a červeně unipolární PWM

## 4 ZÁVĚR

V této práci se povedlo realizovat zdroj signálu PWM použitelný v laboratorní výuce. Jedná se sice o prototyp, ale je zde uveden seznam součástek, schéma, klišé a mapa osazení součástkami. V případě potřeby by tedy neměl být problém s výrobou více kusů do školních laboratoří. Je zde i návod k použití, který by měl usnadnit seznámení se s výrobkem. Pro použití výrobku k reálné regulaci je pochopitelně zapotřebí výstupní signál výkonově posílit. To už ale nespadá do této práce. Zde se jednalo o zdroj signálu. Ten je k dispozici jak v bipolární, tak v unipolární podobě.

# LITERATURA

- [1] BELZA, Jaroslav. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 247 s. ISBN 80-730-0060-1.
- [2] BRANDŠTETTER, Pavel. *Elektronika*. Skriptum. Dotisk 2. vyd. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 1999, 313 s. ISBN 80-7078-966-2
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. 2. vyd. Praha: BEN, 1997, 341 s. ISBN 80-86056-02-3.
- [4] VLČEK, Jiří. *Moderní elektronika*. 1. vydání. Praha: BEN, 2003, 237s.
- [5] MALLAT, Jaroslav a Jiří KROFTA. *Stabilizované napájecí zdroje pro mikroelektroniku*. 2. doplněné vyd. Praha: SNTL, 1986, 263 s.
- [6] FIGALLA, Silvestr. PWM regulátor. [online]. [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://pokusy.chytrak.cz/schemata/wmp.htm>
- [7] Quad Low-Noise JFET-Input General-Purpose Operational Amplifier. TEXAS INSTRUMENTS. [online]. 1996 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tl074.pdf>

# SEZNAM PŘÍLOH

Seznam součástek

Výkres celkového schéma

Klišé desky plošných spojů

## Seznam součástek

Označení	Hodnota	Popis
R <sub>15</sub>	1k	Rezistor 0,25W
R <sub>23</sub> , R <sub>27</sub> , R <sub>31</sub>	3k3	Rezistory 0,25W
R <sub>28</sub> , R <sub>29</sub>	4k7	Rezistory 0,25W
R <sub>11</sub>	5k1	Rezistor 0,25W
R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub> , R <sub>4</sub> , R <sub>5</sub> , R <sub>6</sub> , R <sub>7</sub> , R <sub>8</sub> , R <sub>13</sub> , R <sub>14</sub> , R <sub>35</sub> , R <sub>36</sub> , R <sub>37</sub> , R <sub>38</sub> , R <sub>39</sub>	6k2	Rezistory 0,25W
R <sub>12</sub> , R <sub>16</sub> , R <sub>17</sub> , R <sub>22</sub> , R <sub>26</sub> , R <sub>30</sub> ,	10k	Rezistory 0,25W
R <sub>18</sub> , R <sub>20</sub> , R <sub>21</sub> ,	47k	Rezistory 0,25W
R <sub>24</sub> , R <sub>25</sub>	68k	Rezistory 0,25W
R <sub>34</sub>	82k	Rezistor 0,25W
R <sub>9</sub> , R <sub>10</sub> , R <sub>19</sub> , R <sub>32</sub>	150k	Rezistory 0,25W
R <sub>61</sub>	4k7	Potenciometr
R <sub>62</sub>	10k	Potenciometr
R <sub>63</sub> , R <sub>64</sub> , R <sub>65</sub>	50k	Potenciometry
C <sub>4</sub> , C <sub>5</sub>	3n3	Kondenzátory fóliové
C <sub>6</sub> , C <sub>7</sub>	4n7	Kondenzátory fóliové
C <sub>3</sub>	47n	Kondenzátor keramický
C <sub>10</sub> , C <sub>11</sub> , C <sub>12</sub> , C <sub>13</sub> , C <sub>14</sub> , C <sub>15</sub> , C <sub>16</sub> , C <sub>17</sub>	100n	Kondenzátory fóliové
C <sub>8</sub> , C <sub>9</sub>	330n	Kondenzátory fóliové
D <sub>5</sub> , D <sub>6</sub> , D <sub>7</sub> , D <sub>8</sub> , D <sub>9</sub> , D <sub>10</sub>	1N4007	Usměrňovací diody
D <sub>3</sub> , D <sub>4</sub> , D <sub>11</sub> , D <sub>12</sub>	BAT48	Schottkyho diody
IC <sub>2</sub> , IC <sub>4</sub>	TL072CN	2 x operační zesilovač
IC <sub>1</sub> , IC <sub>3</sub>	TL074IN	4 x operační zesilovač
S <sub>1</sub>		Rotační přepínač trojpolohový

